

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-186424

(43)Date of publication of application : 14.07.1998

(51)Int.Cl.

G02F 1/35

(21)Application number : 09-341584

(71)Applicant : IMRA AMERICA INC

(22)Date of filing : 11.12.1997

(72)Inventor : STOCK MICHELLE L DR

BENDETT MARK P DR

GALVANAUSKAS ALMANTAS DR

HARTER DONALD J DR

SUCHA GREGG D DR

(30)Priority

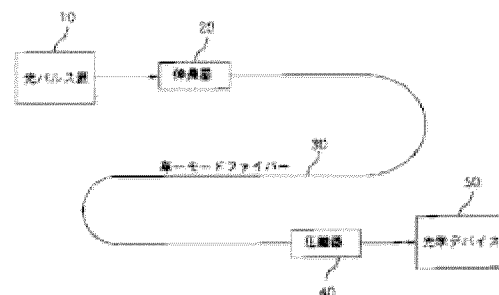
Priority number : 96 763381 Priority date : 13.12.1996 Priority country : US

(54) VERY SHORT LIGHT PULSE TRANSMITTING DEVICE, GENERATING DEVICE, AND TRANSMISSION METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a means transmitting a very short light pulse with a high peak power to a required point in an optical device.

SOLUTION: This very short light pulse transmitting device is provided with a pulse expander 20 receiving the super-short light pulse with a high peak power and expanding its pulse width and an optical fiber 30 transmitting the light pulse over a required distance and having the dispersion compensating other dispersion so that the light pulse is re-compressed sufficiently in the required point in the optical device 50. The pulse width of the light pulse is expanded by the expander 20, and a chirp light pulse with a low peak power is formed. Thus pulse whose dispersion is compensated while it is transmitted through the optical fiber 30, and is re-compressed by the optical fiber 30 or a



compressor 40 to be transmitted to the optical device 50. Since the peak power in the optical fiber 30 is small, the super-short light pulse hardly by affected by a nonlinear effect.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-186424

(43) 公開日 平成10年(1998) 7月14日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	F I
G 0 2 F 1/35		G 0 2 F 1/35

審査請求 未請求 請求項の数32 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願平9-341584	(71) 出願人	593185670 イムラ アメリカ インコーポレイテッド アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン アーバー ウッドリッジ・アベニュー1044
(22) 出願日	平成9年(1997)12月11日	(72) 発明者	ミッシェル エル ストック アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ ー レイバイン・コート4968番地
(31) 優先権主張番号	08/763381	(72) 発明者	マーク ビー ベンデット アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ ー ダニントン486番地
(32) 優先日	1996年12月13日	(74) 代理人	弁理士 大川 宏
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

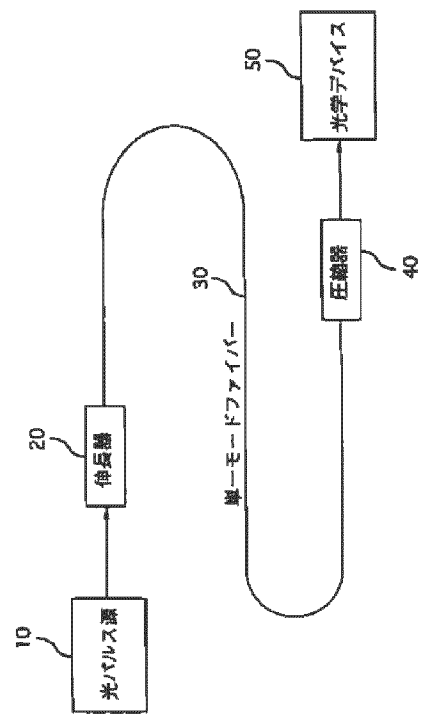
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超短光パルスの伝達装置、発生装置および伝達方法

(57) 【要約】

【課題】 高ピークパワーをもつ超短光パルスを、光学デバイス内の所望の点に伝達する手段を提供すること。

【解決手段】 本発明の超短光パルスの伝達装置は、高ピークパワーを持つ超短光パルスを受信しそのパルス幅を引き伸ばすパルス伸張器20と、所望の距離にわたって光パルスを伝達し光学デバイス50内の所望の点において同光パルスが十分に再圧縮されているように他の分散を補償する分散を有する光ファイバー30とを備える。伸張器20により、光パルスのパルス幅は引き伸ばされ、低ピークパワーを持つチャープ光パルスが形成される。同パルスは、光ファイバー30を通じて伝送されるうちに分散が補償され、光ファイバー30または圧縮器40で再圧縮されて光学デバイス50へ伝達される。光ファイバー30内でのピークパワーが小さいので、超短光パルスは非線形効果の影響を受けにくい。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 高ピークパワーを持つ超短光パルスを受信し、該光パルスのパルス幅を引き伸ばすパルス伸張器と、

所望の距離にわたって光パルスを伝達し、光学デバイス内の所望の地点において該光パルスが十分に再圧縮されているように、該光パルスに影響を与える他の分散を補償する分散を有する光ファイバーと、を備えた、高ピークパワーを持つ超短光パルスを光学デバイスへ伝達するための超短光パルスの伝達装置。

【請求項2】 前記パルス伸張器は、チャープ光ファイバースラッグ格子、一対の回折格子、および一対のプリズムのうちいずれかである、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項3】 前記光ファイバーは、単一モード光ファイバーである、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項4】 前記光ファイバーは、増幅光ファイバーである、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項5】 前記光ファイバーは、高ピークパワー光パルスを前記光学デバイスへ伝達するために、該光学デバイス内の所望の地点において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、伝搬中に該光パルスの前記パルス幅を圧縮する、請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項6】 さらに、前記光学デバイス内の所望の地点において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、前記光ファイバー内を伝達する該光パルスの前記パルス幅を圧縮するパルス圧縮器をも備える、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項7】 前記パルス圧縮器は、チャープ光ファイバースラッグ格子、一対の回折格子、および一対のプリズムのうちいずれかである、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項8】 前記光学デバイスは、標本の分析に使用される走査型二光子レーザー顕微鏡である、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項9】 前記光ファイバーは、標本において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、前記顕微鏡によって発生した分散を補償する、

請求項8記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項10】 さらに、前記光パルス源の下流に設置され、該光パルス源によって発生された前記光パルスの周波数を前記光学デバイスが要求する周波数へと変換する周波数変換装置をも備える、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項11】 高ピークパワーを持つ超短光パルスを受信し、受信した該光パルスのパルス幅を引き伸ばすと共に、該光パルスの周波数を変化させる周期ボーリング

非線形周波数変換装置と、

所望の距離にわたって光パルスを伝達し、光学デバイス内の所望の地点において該光パルスが十分に再圧縮されているように、該光パルスに影響を与える他の分散を補償する分散を有する光ファイバーと、を備えた、高ピークパワーを持つ超短光パルスを光学デバイスへ伝達するための超短光パルスの伝達装置。

【請求項12】 前記光ファイバーは、単一モード光ファイバーである、

10 請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項13】 前記光ファイバーは、増幅光ファイバーである、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項14】 前記光ファイバーは、前記高ピークパワーパルスを前記光学デバイスへ伝達するために、該光学デバイス内の所望の地点において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、伝搬中に該光パルスの前記パルス幅を圧縮する、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

20 【請求項15】 さらに、前記光学デバイス内の所望の地点において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、前記光ファイバー内を伝達する該光パルスの前記パルス幅を圧縮するパルス圧縮器をも備える、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項16】 前記パルス圧縮器は、チャープ光ファイバースラッグ格子、一対の回折格子、および一対のプリズムのうちいずれかである、

請求項15記載の超短光パルスの伝達装置。

30 【請求項17】 前記光学デバイスは、標本の分析に使用される走査型二光子レーザー顕微鏡である、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項18】 前記光ファイバーは、前記標本において前記光パルスが十分に再圧縮されているように前記顕微鏡によって発生した分散を補償する、

請求項17記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項19】 前記周期ボーリング非線形変換装置は、周期ボーリング・ニオブ酸リチウム（PPLN）結晶である、

請求項1記載の超短光パルスの伝達装置。

40 【請求項20】 超短光パルスを受信し、該光パルスのパルス幅を引き伸ばすパルス伸張器と、

該光パルスを増幅し、本装置内の該光パルスに影響を与える他の分散を補償する分散を持つ増幅媒体と、

該光パルスのパルス幅を圧縮し、かつ該光パルスの周波数を変換する周期ボーリング非線形周波数変換装置を含むパルス圧縮器と、を備える、高ピークパワーを持つ超短光パルスを発生するための超短光パルスの発生装置。

【請求項21】 チャープ光パルスを受信し、所望の距離にわたって該光パルスを伝達する光ファイバーと、該光ファイバーから該光パルスを受信して、該光パルス

のパルス幅を圧縮し、かつ該光パルスの周波数を変換する周期ボーリング非線形周波数変換装置とを有し、前記光ファイバーは、光学デバイス内の所望の地点において該光パルスが十分に圧縮されているように、本装置内で該光パルスに影響を与える他の分散を補償する分散を持つ、高ピークパワーを持つ超短光パルスを光学デバイスへ伝達するための超短光パルスの伝達装置。

【請求項22】 前記光ファイバーは、増幅光ファイバーである、

請求項21記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項23】 前記光ファイバーは、単一モード光ファイバーである、

請求項21記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項24】 前記光ファイバーは、前記高ピークパワー光パルスを前記光学デバイスへ伝達するために、該光学デバイス内の所望の地点において該光パルスが十分に再圧縮されているように、該光パルスの伝搬中に前記パルス幅を圧縮する、

請求項21記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項25】 前記光学デバイスは、標本の分析に使用される走査型二光子レーザー顕微鏡である、

請求項21記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項26】 前記光ファイバーは、前記標本において前記光パルスが十分に再圧縮されているように、前記顕微鏡によって発生した分散を補償する、

請求項25記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項27】 前記周期ボーリング非線形変換装置は、周期ボーリング・ニオブ酸リチウム（PPLN）結晶である、

請求項21記載の超短光パルスの伝達装置。

【請求項28】 高ピークパワーを持つ超短光パルスを発生させる発生段階と、該光パルスのパルス幅を伸張する伸張段階と、光ファイバーを通じて該光パルスを伝送する伝送段階と、

分散を補償することにより該光ファイバーを通じて伝送された該光パルスの該パルス幅を圧縮する圧縮段階と、光学デバイスへ該光パルスを伝達する伝達段階と、を備える、高ピークパワーをもつ超短光パルスの伝達方法。

【請求項29】 前記圧縮段階において、前記光学デバイスによる分散を補償する、

請求項28記載の超短光パルスの伝達方法。

【請求項30】 さらに、前記発生段階において発生した前記パルスの周波数を、前記光学デバイスが要求する周波数へと変換する周波数変換段階をも備える、

請求項28記載の超短光パルスの伝達方法。

【請求項31】 前記周波数変換段階は、前記伝送段階の前に実行される、

請求項30記載の超短光パルスの伝達方法。

【請求項32】 前記周波数変換段階は、前記伝送段階の後に実行される、

請求項30記載の超短光パルスの伝達方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は一般的に、光学測定システムなど、高ピークパワーの超短パルスを必要とする様々な種類の光学デバイス用の光パルス伝達システムに関するものである。特に、本発明は、高ピークパワーのパルスを伝達するために、システム内の様々な分散効果を補償できる光ファイバーを用いた、光パルス伝達システムに関するものである。

【0002】 すなわち本発明は、高ピークパワーを持つ超短光パルスを光学デバイスへ伝達するために使用される超短光パルスの伝達技術分野に属する。

【0003】

【従来の技術】 超短光パルス源は現在、ピコ秒からサブピコ秒の持続時間のパルス幅を持つパルスを、様々な波長やパルス・エネルギーで、そしてGHzの範囲までの反復率において発生できるものとして知られている。このような光パルス源は、一般的に計測や画像処理など、時間ゲートや、高ピークパワーまたは高強度による励起を要する用途に使用されている。超短光パルスは、高速な空間・時間分解能を提供し、高ピークパワーを特定の非線形事象の励起（多光子蛍光媒質の励起など）に必要な、焦点に合わせが可能な光線として提供することができる。これらの能力は、生物学および医学画像、度量数学、テラヘルツ発生、光伝達および電子光学サンプリング、そして光学式時間ドメイン反射率計など多様な用途に利用されている。

【0004】 超短光パルスを試験装置または測定位置へ伝達するために、現在使用されている技法には、ミラー、レンズ、光ファイバー、ビームスプリッター、そして二色性素子などの光学式構成要素が使用されている。超短光パルスがこれらの素子から成る伝達システムを通過すると、ピークパワーの劣化や、時間プロフィール形の歪みが発生する。これらの変化の結果、分解能、またはS/N比（信号対雑音比）の低下が生じる場合もある。光システム内を伝搬している超短光パルス信号のピークパワーおよび時間的形狀における変化は、損失および分散に起因する。更に、高ピークパワーでは、光パルスが非線形効果によって歪められる場合もある。

【0005】 超短光パルスは、一定の範囲の光周波数（または波長）から構成されており、これらの周波数は、パルスの帯域幅を形成している。ある帯域幅の最短パルス（帯域幅限定パルス）は、時間的に重複した全ての周波数成分を有する。システム内を伝搬するにつれて、これらの周波数成分（波長構成要素）は、各々異なる遅延を経験することになる。これらの遅延の結果、前記の超短光パルスのピークパワーおよび時間的形狀の歪

みが生じることになる。その結果、瞬間的周波数がパルス持続時間の関数として変化する周波数チャープパルスが生じることになる。

【0006】光信号の伝達に使用される普通の材質のうち、ガラスなど、光学的に透明で一般的な材質を通じた伝搬の結果として生じる損失は、ごくわずかである。しかし、周波数に依存する媒質の屈折率 $n(\nu)$ のせいで、 c を真空状態で光の速度とした場合、光信号の伝搬速度 v は、 $v=c/n(\nu)$ となる。波長 λ と周波数 ν との関係が $\lambda=c/\nu$ で表わされるので、波長 λ が異なる各波長の構成要素(成分)は、材質内で各々異なる伝搬速度を経験することになる。この結果は、色分散(chromatic dispersion)と称される。群速度分散(GVD)のせいで、光パルス信号とこのような材質との相互作用を通じて、パルス幅が広げられることもある。その結果、帯域幅内の低周波数の構成要素と高周波数の構成要素とは、分散媒質を通過後、各々異なる時間に到着することになる。分散の正負によって、低周波数の構成要素は高周波数の構成要素より早く、または遅く到着することになる。ガラスの場合、ゼロ分散波長(1300nm)より短い波長では正の分散を有するので、光パルスの高周波数の構成要素は低周波数の構成要素に比べて遅めに伝搬する。逆に、ゼロ分散波長以上になるとガラスが負の分散を有するので、光パルスの低周波数の構成要素が高周波数の構成要素に比べて遅めに伝搬する。よって、超短光パルスが通過する光学素子は、どれも光信号に歪みをもたらす可能性がある。

【0007】幾つかの一般的な光学素子やシステムを利用することによって、光の分散を操作することができる。これらには、ガラス製プリズム、回折格子、光ファイバ格子、そして光ファイバーなどが含まれる。これらの素子は、いかなる波長でも正負両方の分散を得ることを可能にすると同時に、周波数チャープの補償も可能にするものである。分散性遅延ラインを形成するために二つのガラス製プリズムを一組として使用する場合、プリズムの間の距離を変化させることによって、異なる量の分散を発生させることができる。同じく、反射的または透過的な回折格子を使用することによって、様々な量の正および負の分散を提供することができる。光ファイバ格子は、光ファイバーのコア内に形成されたチャープブラッグ格子である。チャープブラッグ格子の場合、異なった波長を空間内の異なった位置で反射させ、そのことにより異なった波長構成要素に異なった時間シフトを加えて光を分散させることができる。約1300nmよりも大きな波長のための特殊な光ファイバーを作成することも可能である。これらの光ファイバーは、導波路分散および物質的分散を併用することによって、正、負、またはゼロに近い適切な分散を発生させることができるものである。

【0008】光学システム内でビーム伝達を行うために

一般的に使用されている光学素子のうち、光ファイバーは実用システムにおける(特にレーザー光源が重く大きい場合に)便利な伝達方法である。光ファイバーを用いると、事前に光学素子の位置を調整して安定させ得るので、システムの信頼性および耐久性を向上させることができる。レーザー光線を閉じこめる光ファイバー伝達法により、典型的なレーザー研究室よりも多様な環境にレーザー光源を設置することができると同時に、レーザー光源をシステムに対して便利な場所に配置することが可能になるので、システムのデザイン上の柔軟性を高めることができる。更に、レーザー光源や光学デバイスの光軸(アラインメント)を狂わせることなく、光ファイバーをシステムから取り外すことも可能である。よって、レーザー光源や光学デバイスの光軸を事前に調整しておけば、両者を別個に梱包して出荷することも可能となる。しかし、光ファイバーには下記のとおり、超短光パルスの時間プロフィールを歪ませるという問題点がある。

【0009】光ファイバーには、特定の波長 λ に対し、単一モード(単一の空間モードのみ伝搬可能)とマルチモード(複数の空間モードが伝搬可能)の二種類がある。単一モードの場合、光ファイバー中のパルス伝搬には次の特性が見られる。

一周波数に依存する損失

一物質的な分散から生じるパルス幅の広がり

一導波路分散

物質的な分散の符号が、正から負、または負から正へと変わる「ゼロ分散」地点(例えば、標準的な遠距離通信用光ファイバーの場合には約1300nm)では、パルス幅が大幅な広がりを経験することなく、パルスが伝搬する場合もある。しかし、物質的分散の効果が減少するにつれて、コアクラッド間のインタフェースにおけるモード閉じ込みが増加して導波路分散が顕著になる。マルチモード・光ファイバーの場合、更に時間的な広がりを起こす可能性のある空間的モードが多数追加されるので、この状況は一層複雑化する。しかし、マルチモード・光ファイバーは光軸調整ミス(ミスアラインメント)に対する許容範囲が大きいので、多くの用途において非常に重要である。

【0010】長距離光ファイバー式遠距離通信システムには、光ファイバーによる伝達距離が長いことにより光信号パルスが広がり、ビットエラー率が高くなるという問題が存在する。この問題は、特殊デザインの光ファイバーによる分散の補償、パルスの事前チャープニングなど、光ファイバ格子を利用した幾つかの処置法によって対処されてきた。しかし、これらのシステムに使用された信号のピークパワーは、非線形効果の発生点以下である。換言すれば、これらのシステムは、光ファイバーを通じた高ピークパワー(ここでは高ピークパワーを1kw以上と定義する)パルスの伝達という課題には対応

していない。

【0011】最適化されたパルス幅の伝達を要求するシステムの一つに、二光子レーザー顕微鏡がある。デンク他が米国特許5,034,613号(特許出願公表平5-503149号)にて公開した通り、このようなシステムは、レーザー走査型顕微鏡、試料の染色用として長い波長(赤または赤外線)の照明により適切な蛍光を放射する蛍光色素、適切な波長を持つピコ秒またはサブピコ秒台のパルスを発生し得るレーザー光源、蛍光色素よりの放射光の検出器、そしてコンピュータによる信号処理によって構成される。超短パルスを発生する目的で、T i : サファイヤ型レーザーやC r : L i S A F 型レーザー等の様々な光源が使用されてきたが、高ピークパワーパルスの伝達は「空中(フリースペース)」で行われてきた。この様なシステムは、M・ミューラー他がオプティックス・レター誌(Vol. 20, No. 9; 1995)の「二光子吸収による高数値アパーチャの焦点内のフェムト秒の測定」にて報告しているが、このシステムでは、パルスが顕微鏡の対物レンズに入射した時点で、レンズがパルスを歪め、パルス幅をかなり広げることが判明している。

【0012】最適化されたパルスを要求するもう一つの用途の例には、光学式計測がある。光学式計測では、光学測定装置を利用し、非破壊的な、非接触手段で物質的パラメータの測定が行われる。この装置には、光パルス源、伝達機構、および、光源が測定物体を照らした後、信号処理のためにその反射光を捕える様に挿入されたプローブが含まれる。パルス化された光源から光線を伝達するためには、プローブに組み込まれた光ファイバーを通して光を伝達すればよい。よって、このプローブは測定システムへの取り付けが便利のように組み立てることができ、試料とほぼ接触するように配置し得る。このシステムにおける解像度は、自己相関器の周波数ダブリング結晶またはクロス相関器の内部にある測定点において高ピークパワー(最短)のパルスが得られるかどうか依存している。しかし、光ファイバーを用いた伝達法そのものが最適化されておらず、測定点への最短パルスを伝達することができないのが現況である。

【0013】その他のシステムでは、モード同期パルスを調査下の試料に光ファイバーで伝達するという機構の変形型が利用されている。特に、H u a n g 他による国際出願PCT/US92/03536には、光学コヒーレンス領域反射率計測のためのシステムが記述されており、このシステムには、短いコヒーレンス長の光源を測定下の試料へ光ファイバーで伝達するという機構が含まれている。このような機構には、広帯域幅、高輝度光源、または、超短パルス(即ち広帯域幅)を発生し得るモード同期光源を利用することができる。この測定技法には、干渉計として配置されたりファレンス(参照)用経路と、試料用経路とが存在する(測定結果を得るため

には、これら二つの経路は、光学的な干渉を起こさなければならない)。この干渉が起こるためには、光源からリファレンスまでの距離と、光源から試料までの光経路距離とが、ほぼ同じでなければならない。この状態は、 $L_{ref} - L_{sample} \sim L_{coherence}$ という数式で表わすことができる。この場合、 L_{ref} は光源からリファレンスまでの光経路距離、 L_{sample} は光源から試料までの光経路距離、そして $L_{coherence}$ は光源のコヒーレンス長である。この条件は、全ての波長にて満たされなければならない。ここで、システムの一辺(レグ)の光ファイバーの長さがもう一方よりも短い場合、例えばスペクトルの青色側の光の場合には、長さが短く高いGVDを持つことが知られている別の光学物質を短い方の辺(アーム)に加え、これらの光経路の距離を同等にすれば、波長に対する相対距離を補償することができるということが認識されている。この補償は、広帯域幅光線の各構成波長が、二つの光経路の終点に同時に到着する(即ち、最短の波長、中間の波長および最長の波長が同時に到着する)ように行われる。モード同期光源と共に使用する場合、パルス幅を短くする必要はない。しかし、チャープは各経路からのパルスにおいて同等でなければならない。

【0014】ボウマ他が、オプティックス・レター誌(Vol. 20, No. 13; 1995)の「モード同期T i : A l 2 O 3 型レーザー光源を利用した高解像度光学コヒーレンス断層撮像法」で報告した同様のシステムでは、モード同期C r : フォルステライト型レーザーを利用して光学コヒーレンス断層撮像が行われている。この場合も、レーザーの光帯域幅は、撮像法にとって非常に重要である。よって、C r : フォルステライトの限定された帯域幅は、自己位相変調を用いて光ファイバー内に帯域幅を発生させるという、公知の方法を用いて高められた。このため、レーザーの出力と撮影システムの入力との間に光ファイバーが加えられ、光軸調整の容易さという副次的効果が達成された。しかしながら、ここでは、最適化されたパルス幅を調査下の試料に伝達することに対する必要性や意図は、存在しなかった。実際、通常の最短の光パルスを得るためには、自己位相変調を避けることが望ましい。

【0015】光ファイバーを利用した伝達機構を活用したシステムは、ハリスによる米国特許5,120,953号にも記述されている。ここでは、光は、走査型共焦点顕微鏡内の試料へ光ファイバーを通じて伝達され、試料で発生した後方散乱した信号は、同じ光ファイバーによって検出される。光ファイバーは、顕微鏡の光学経路上に配置された光学部品の厳密な位置調整を不要にし、また、入力光モードと後方散乱された信号光とのための空間的フィルターとしての役割を果たすために使用されている。この様なシステムでは、単一光子蛍光発光が信号源であり、その蛍光発光は、試料へ入射する光のビー

ク強度よりも平均的な強度に比例するので、光のパルス幅を気にする必要がない。このため、この用途にはパルス光源ではなく、連続波レーザー（CWレーザー）が使用されている。

【0016】走査型共焦点顕微鏡などの光学式測定システムでは、光ファイバーを利用した伝達機構は特に有利である。例えば、伝達光ファイバーで結合された超短パルス光源を組み合わせて光学システムを取り入れた測定システムなどが挙げられる。二光子顕微鏡の場合、高ピークパワーかつ、総エネルギー量が低い光パルスを試料に伝達することが不可欠である。二光子吸収が許容し得る率で発生するよう、レーザーの強度（ W/cm^2 ）は十分に高くなければならない。しかし、パルスが一定のエネルギーレベルを超えると、パルスが試料を光漂白して試料にダメージを与える可能性が出てくる。従って、超短パルス光源を用いた測定システムを提供するためには、パルスの継続時間が短く高ピークパワーで、かつ、総エネルギー量が低いパルスを伝達する手段が要求される。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的（課題）は、測定システムの光学デバイスへ光ファイバーを通して高ピークパワーパルスを伝達し、さらに、高ピークパワーパルスのパルス形状特性を所望の相互作用地点で最適化することである。本発明の他の目的は、例えば光測定システムなどの光学デバイス内で生じる分散効果を補償するために、光パルス源または伝達用光ファイバー内の分散効果を制御することである。

【0018】本発明のさらなる目的は、高ピークパワーが光ファイバー伝達システムを通して伝搬した場合に、非線形効果により発生するパルスの歪みを低減することである。

【0019】

【課題を解決するための手段】これらの目的（課題）を達成するために、本発明は、高ピークパワーの超短パルスを発生し得る超短パルスレーザー光源を含む。光パルスを伝達用光ファイバーを通じて伝達する前に、光パルスのパルス幅は引き伸ばされ、低ピークパワーを持つ光パルスが形成される。パルスの引き伸ばしは、レーザー光源内または別体の伸張器にて行われる。レーザー光源に直接由来する光パルスのチャープは、その他の分散デバイス（即ち、ホログラフィー格子、光ファイバー格子、金属格子、光ファイバー、特殊光ファイバー、またはプリズム）と共に使用されても良いし、分散デバイス無しで使用されても良い。

【0020】引き伸ばされた光パルスは光ファイバーを通じて伝達され、同光ファイバーは高ピークパワーの超短光パルスを必要とする光学デバイスへパルスを伝達する。光パルスのピークパワーはパルス幅の引き伸ばしによって低下するので、高ピークパワーパルスが光ファイ

バー内で経験する非線形効果を回避することが可能となる。光ファイバーやパルス圧縮器の分散により、パルスレーザー光源や伸張器で発生した分散が相殺され、再圧縮された光パルスが光学デバイスへと伝達される。光パルスが、光学デバイス内の作用地点（例えば標本や探知器など）に至るまでに十分に再圧縮されるように、光学デバイス内の構成要素によって発生させられた分散は、光ファイバー伝達システム（本発明の超短光パルスの伝達装置）によって、事前に補償されることが好ましい。

【0021】本発明は、二光子共焦点顕微鏡での観測のために染色された生物学的細胞組織など、測定システム内の試験標本へ、または、ある物体の位置を自己相関技法によって測定するために、その物体の表面へと（1kw超の）高ピークパワーパルスを光ファイバーを通じて伝達するために使用することができる。更に、本発明の光ファイバー伝達システムには、伝達用光ファイバーの前方または後方に周波数変換装置が装備される場合もある。周波数変換装置は、レーザー光源によって発生された周波数以外の周波数を持つ光パルスを、光学デバイスへ効率的に伝達することを可能にするものである。

【0022】周期ポーリング・ニオブ酸リチウム結晶（PPLN）など、チャープ周期ポーリング非線形周波数変換装置は、周波数変換装置および伸張器（または圧縮器）の両方として使用することができる。PPLNは、入射パルスの二倍の周波数を持つパルスを発生することができ、結晶の周波数チャープは、必要に応じて補償要素の分散の極性および大きさに合うように設計することができる。

【0023】

【発明の実施の形態】本発明の上記およびその他の目的と利点を更に明確にするために、本発明の模範的な実施の形態を、図面を参照しながら詳しく説明する。図1は、本発明の一般的な実施例に従う光ファイバー伝達システム（超短光パルスの伝達装置）の構成を表している。図1に表示されている通り、光パルス源10は、高ピークパワーを持つ光パルスを発生する。光パルス源10には、例えば、受動型モード同期光ファイバーレーザーを利用することができ、これに発振器および増幅器が含まれる場合がある。光パルス源10によって発生された超短光パルスは、100ピコ秒未満のパルス幅と、1kw以上のピークパワーとを持つ。光パルス源10としては、エルビウムドープ光ファイバーレーザーが好ましい。なぜならば、エルビウムドープ光ファイバーレーザーは、正の分散を有する光ファイバーや負の分散を有する光ファイバー、または低分散光ファイバーとの併用に適した波長（1.55 μm ）の光を発生し得るからである。

【0024】光パルスは、光パルス源10からパルス伸張器20へ送られる。パルス伸張器20の構成要素としては、光ファイバー、チャープ光ファイバーブラッグ格

子、一對の回折格子、または、一對のプリズム等の光学要素を利用し得る。パルス伸張器20は、入射光パルスのパルス幅を延ばし、チャープ光パルスを形成する。パルス幅が延長された結果、光パルスのピークパワーは減少する。次に、延長された光パルスは、単一モード光ファイバー30を通じて伝達され、同光ファイバーは光パルスを所望の位置へと伝達する。ここで、マルチモード光ファイバーでは、伝達距離が異なる異モードが多数存在し、パルスの分裂へとつながるので、マルチモード光ファイバーよりも単一モード光ファイバーの方が好ましい。

【0025】一般的に、高ピークパワーは強い非線形効果による歪みを生じさせてピークパワーの低下をもたらすので、単一モード光ファイバーは高ピークパワーを持つ光パルスの伝達には向いていない。本実施例によれば、光パルス源10によって発生された光パルスの高ピークパワーが、単一モード光ファイバー30へ伝達される前に低下するので、この問題を克服することができる。言い替えれば、光パルスのピークパワーは、パルス伸張器20によってパルスを引き伸ばす過程で低下する。よって、単一モード光ファイバー30を通じて伝達する際に、光パルスが非線形効果によって強く歪められたり、そのピークパワーが低下したりすることはない。

【0026】圧縮器40は、単一モード光ファイバー30を通じて伝達された光パルスのパルス幅を圧縮する。本実施例では、圧縮器として、光ファイバー、一對の回折格子、チャープ光ファイバーブラッグ格子、または一對のプリズムを使用し得る。あるいは、光ファイバー30そのものを圧縮機として使用することもできる。この場合、光学デバイス50内の所望の相互作用地点で、光パルスを本来の帯域幅およびピークパワーへと十分に再圧縮するために、単一モード光ファイバー30および光学デバイス50におけるチャープ（即ち分散）は、光ファイバー30への入射光と同量で逆極性でなければならない（即ち、光パルス源10やパルス伸張器20によって伝達されたチャープと、同量で逆極性でなければならない）。従って、光パルス源10から光学デバイス50に至るシステム全体の分散を補償するように、単一モード光ファイバー30の長さが設計される。単一モード光ファイバー30の分散は、パルス伸張器20の分極と逆極性で、非線形効果が発生する距離をなるべく短くできるように高いことが望ましい。光学デバイス50は、既知の分散を持ち、測定点または検知器など、光学デバイス50内の特定位置において、最終的な高ピークパワーパルスを生じる。

【0027】図1では、光パルス源10とパルス伸張器20とは、別装置として表示されているが、光パルス源10により発生するチャープ光パルスで十分な場合には、別体のパルス伸張器20が不要になる場合もある。即ち、この様なレーザー光源によって発生したチャープ

光パルスは、既に適切なピークパワーやパルス幅特性であるので、別体の伸張器を使用してパルス幅を延ばし、ピークパワーを減少させる必要がない。

【0028】本実施例の装置は、二つの重要な問題を解決することができる。第一に、伝達用光ファイバーの分散が補償されるため、測定点または検知器など、光学デバイス50内の特定地点において、パルスの最短持続時間（および最高ピークパワー）を達成することができるということである。第二に、通常光ファイバー内の高ピークパワーパルスが経験する非線形効果による歪みが発生することなしに、高ピークパワー光パルスが、光ファイバー伝達システムにより伝達されるということである。

【0029】さらに詳しく説明すると、ラマン発生や自己位相変調などの非線形効果の開始は、光パルスを歪ませ広げることになる。光ファイバー内において、パルスの分散長 $L_d = T_0^2 / |\beta_2|$ が、非線形長 $L_N = 1 / \gamma P_0$ より短い場合（ $L_d / L_N < 1$ ）、光ファイバーにおけるこれらの相互作用の悪影響は無視することができる。このうち、 $|\beta_2|$ は光ファイバー分散係数の絶対値、 γ は光ファイバー非線形係数、 P_0 はレーザーパルスのピークパワー、そして T_0 は圧縮されたパルスの持続時間である。分散長 L_d および非線形長 L_N は、光ファイバー上のパルス展開（pulse evolution）に関して分散と非線形効果とのどちらが重要になるかについて、長さのスケールを提供するものである。言い替えれば、分散長 L_d が非線形長 L_N よりも短い場合には、パルスは、非線形効果が時間的およびスペクトル的な歪みを起こすよりも、はるかに速く伸張または圧縮されることになる。

【0030】分散長 L_d が非線形長 L_N よりも長い（ $L_d / L_N > 1$ ）からといって、1 kW以上のピークパワーを有するレーザーパルスが、分散がほとんど無い状態で光ファイバー内を伝搬することはできない。しかし、チャープパルス（即ち、光パルス源10またはパルス伸張器20によって引き伸ばされたパルス）を伝搬させることによってピークパワーが低下され、分散長 L_d を変えることなく非線形長 L_N を増加させることができる。その後、例えば、大きな光ファイバー分散（短い分散長）を持つ光ファイバーなどを利用することによって、そのパルスを再圧縮することができる。この結果、光パルスは、光ファイバーの末端に限り、短い持続時間と高いピークパワーとを持つことになる。

【0031】本発明によれば、正負両方の分散効果に対し、分散補償を提供することができる。このことにより、例えば走査型二光子レーザー顕微鏡のターレット内の対物レンズなど、システムの光学経路を調整して柔軟な最適化が達成でき、システム使用者が事前に適切な補償を行えるようになる。このような方法は、システム設計の柔軟性、耐久性、そして信頼性を向上させるだけで

なく、システム全体におけるS/N比および解像度を改善させることができる。

【0032】本発明の補償方法は、エルビウムドープ・モード同期光ファイバーレーザーを実例とすると、詳しく説明することができる。このタイプのレーザーの放出波長は、1550nm付近にあり、標準的な単一モード光ファイバーの中を伝搬した場合、異常分散または負の分散を経験するものである。ゼロ分散点（正負両方の分散範囲の間）は、1300nm付近の波長で起こる。しかし、導波路分散は、ゼロ分散点付近でも強い場合がある。実際、適切な導波路デザインを用いることによって、1550nmでの分散極性を変化させることができる。よって、正負両方の分散極性を持つ光ファイバーを作成することができる。エルビウムドープ・モード同期光ファイバーレーザーを設計する場合、正負いずれの分散極性を持つ光ファイバーでも使用することが可能である。よって、出力パルスを調整することによって一定の残存分散を与え、その残存分散が、伝達経路上の光ファイバーおよび光学デバイス50内の分散と同量で逆極性となるように、最適化することができる。

【0033】非常に高いピークパワー光パルスを達成するためには、事前補償（引き伸ばし）と圧縮段階との間に増幅器を配置することによって、チャープパルス増幅（CPA）光ファイバー伝達システムを実施することができる。そして同システムは、所定の用途の測定デバイスにおける光ファイバー伝達に、使用することができる。CPA光ファイバー伝達システムには、単一パス増幅器が使用され、多くの場合は出力端子における偏光を保持する必要があるため、偏光保持（偏光面保存）光ファイバー増幅器が使用される。CPAを使用することによって、本発明の光ファイバー伝達システム（超短光パルスの伝達装置）は、 $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^7$ ワットのピークパワーを持つ光パルスを伝達することができる。

【0034】光パルス源10によって発生させられた光を試料に当てる前に、その周波数を変換しなければならないことが多くある。従って、本発明の光ファイバー伝達システムに、周波数変換結晶を取り入れることもできる。

【0035】

【実施例】

【実施例1】図2は、本発明の実施例1の光ファイバー伝達装置（超短光パルスの伝達装置）の構成を表わす。図2に示されている通り、光パルス源10から発生された光パルスは、チャープPPLN60へ伝達され、そこでパルスの周波数変換とパルス伸張との両方が行われる。

【0036】チャープPPLN60は、チャープされた周期ポーリング非線形周波数変換装置（周期ポーリング・ニオブ酸リチウム結晶）である。周波数ダブリング中の超短パルスの再圧縮を目的としたチャープ疑似位相整

合格子の使用は、Byer（CLEOパシフィック・リム誌、95年7月）によって初めて、次にFejer（CLEOパシフィック・リム誌、96年5月）により、そして最終的にArbore、Fejer、Harter、Marco、そしてFermann（CNOM年次会議、96年9月）によって更に詳しく提案された。チャープ疑似位相整合（QPM）結晶におけるチャープ補償と周波数変換の能力は、これらの結晶の二つの主な特徴に基づいている。一つ目の特徴は、いかなる非線形バルク物質にも見られるように、同じ伝搬経路に沿っていても、入力された基本パルスと周波数変換された出力パルスとは群速度が異なるということである。この結果、これら二つのパルスの間で時間的なウォークオフが生じることになる。二つ目の特徴は、相互に異なる複数の入力波長の周波数変換（例：二次高調波の発生）を、パルス伝搬経路沿いにある異なった空間的位置に局在化することができるように、疑似位相整合結晶を設計することができるということである。これは、従来のチャープされていないQPM格子よりも、むしろチャープQPM格子を使用することによって達成することができる。このような結晶へと発射された場合、基本波長において帯域制限されたパルスは、周波数チャープを持つ周波数変換された（二次高調波）パルスを発生する。適切な結晶を設計することによって、この周波数チャープを、補償が必要な構成要素の分散の大きさおよび極性に合わせるすることができる。

【0037】この二次高調波（SH）パルスの持続時間 ΔT は、群速度のウォークオフの大きさによって決定される。即ち、 $\Delta T = L / \nu_{SH} - L / \nu_{Fund}$ である。ここで、 L は結晶の長さ、 ν_{SH} および ν_{Fund} は、それぞれ二次高調波の波長および基本波の波長における群速度を表わしている。二次高調波パルスの周波数帯域幅 Δn は、QPM周期変化（チャープ帯域幅）の大きさによって決定される。この周波数チャープを補償するために必要な分散は、 $\Delta T / \Delta n$ に等しい。基本パルスを互いに逆の二方向から発射することによって、逆極性の周波数チャープを持つ二次高調波パルスを生じさせ得る。

【0038】チャープPPLN60は、電界ポーリングによって形成されたチャープ反転ドメイン格子を伴う結晶である。1550nmポンピングと780nm二次高調波との場合、群速度ウォークオフは、およそ300 fs/mmである。チャープPPLNの帯域幅は、数十ナノメートルになり得る。これは、予め十分に引き延ばされた二次高調波パルスを発生して、さらに1メートルから3メートル程度の光ファイバーを使用する光学システムでの補償を行い得ることを意味する。

【0039】【実施例2】図3は、本発明の実施例2の光ファイバー伝達装置（超短光パルスの伝達装置）を表わす。図3では、単一モード光ファイバー30の顕著な非線形特性を避けるために、光パルスが十分なチャープ

を持つチャープ光パルス源11によって発生される。チャープPPLN70は、単一モード光ファイバー30の後方に配置される。その結果、基本周波数は、単一モード光ファイバー30を通じて伝達され、チャープ光パルス源11および単一モード光ファイバー30のチャープは、チャープPPLN70によって補償される。周波数変換とパルス圧縮との両方にPPLNを使用することの利点の一つは、周波数変換された光が光ファイバーへ再入射することがないので、周波数変換された波長で、より高いピークパワーを持つパルスを測定デバイスへ伝達することができるということである。

【0040】対照的に、実施例1（図2参照）の光パルス源の様に、チャープの無いレーザー光源の場合は、最初にチャープ疑似位相整合格子（チャープPPLN60）によって周波数変換を行うことが好ましい。その後、単一モード光ファイバー30が周波数変換されたパルスのチャープを再圧縮する。よって、PPLNは、光ファイバーの前方または後方のどちらか一方に配置することができる。また、複数の周波数変換装置が存在する場合は、PPLNを光ファイバーの両端に配置することもできる。チャープ疑似位相整合物質の利点は、適切なチャープが得られるように設計できるということである。

【0041】【実施例3】図4は、本発明の実施例3の光ファイバー伝達装置（超短光パルスの伝達装置）を表わす。図4に示されている通り、周波数変換装置80が、光パルス源10と伸張器20との間に接続されており、光が単一モード光ファイバー30を通過する前に、周波数変換装置80が周波数を変換するようになっている。周波数変換装置80は、光学デバイス50にとって適切な周波数の光パルスが、光学デバイス50へ伝達されるように、光の周波数を変換する。

【0042】図5は、本発明の実施例3の光ファイバー伝達装置（超短光パルスの伝達装置）の変形態様の構成を表わす。図5では、周波数変換装置80は、圧縮器40と光学デバイス50との間に接続されている。図4および図5に示されている通り、周波数変換装置80は、伝達用光ファイバーの前方または後方のどちらか一方に配置することができる。幾つかのシステムでは、周波数変換装置を光ファイバーの前方に設置することが好ましい。これは通常、周波数変換の効率は50%以下であり、この非効率のゆえにピークパワーや光ファイバーの非線形性が低下するからである。しかし、その他のシステムでは、周波数変換装置を光ファイバーの後方に配置することが好ましい。これは、エルビウムドープ光ファイバーレーザーの波長においては、正負いずれの分散を持つ光ファイバーでも利用できるので、分散補償のために光ファイバーを使用し得るからである。最も一般的な周波数変換法は、周波数ダブリング法である。しかし、この光ファイバー伝達システムは、光パラメトリック発生

（OPG）と、光パラメトリック増幅（OPA）と、同様にOPG、OPAおよびまたは周波数差混合によるダブリングを含む複数の多周波数変換を組み合わせた手段と、共に使用し得る。

【0043】実施例3およびその変形態様では、周波数変換装置は、前述のエルビウムドープモード同期光ファイバーレーザーと併用することができる。特に、約780nmの波長を持つ光パルスを作成するために、ダブリング結晶を使用してレーザー光源の周波数を倍増させることができる。これらの短波長パルスは、レーザー光源によって発生された1550nm入力パルスに対してコヒーレントであるので、入力パルスの位相情報を維持することができる。この結果、超短パルス発振器と光ファイバー伝達手段とを適切に設計することによって、780nm程度の光が測定・画像システムの光経路を通過する際に経験する分散を、1550nmにおいて事前に補償することが可能となる。このことは、以前にも指摘したように、780nm近傍の波長で発生した光が複数の光構成要素内で経験する分散極性は、正または負のどちらかになるので、正負両方の分散極性に対応する上で非常に重要である。

【0044】

【発明の効果】以上詳述したように、レーザー光源からの出力を光ファイバーで伝達することには、幾つかの効果がある。例えば、入力波長に関して単一モード光ファイバーを使用する場合には、光軸がずれにくく安定してアラインメントが得られることや、マルチモード入力の空間的フィルタリングも維持できることなどの効果がある。入力信号を光ファイバーによって光システムへと伝達する場合には、光ファイバービグテールの交換によって、入力信号を容易に切り替えることができる。以前にも述べたように、光ファイバーは、発射された波長と光ファイバーの設計とによって、異なった分散極性を持つことができる。従って、レーザーの出力に光ファイバービグテールを加えると、発射された種類の分散を更に補償できると同時に、光システムに入射する際の光軸調整（アラインメント）を容易にすることができる。また、超短パルスレーザー光源の製造過程で予め校正された特性を、ユーザーが調節することも可能になる。

【0045】なお、ここでは幾つかの模範的な実施例について説明したが、当業者であれば本発明の本質および範囲から外れることなく、多くの修正や変種を実施することが可能であり、本発明は前述の特許請求の範囲によって定義される。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の超短光パルスの伝達装置の概念ブロック図

【図2】 実施例1の超短光パルスの伝達装置のブロック図

【図3】 実施例2の超短光パルスの伝達装置のブロック図

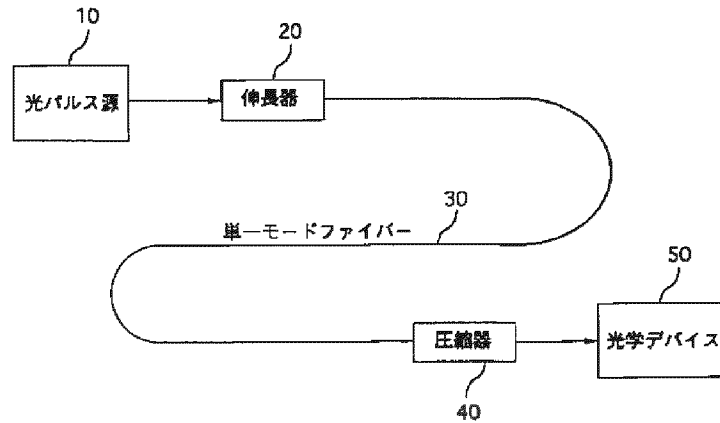
【図4】 実施例3の超短光パルスの伝達装置のブロック図

【図5】 実施例3の変形態様の超短光パルスの伝達装置のブロック図

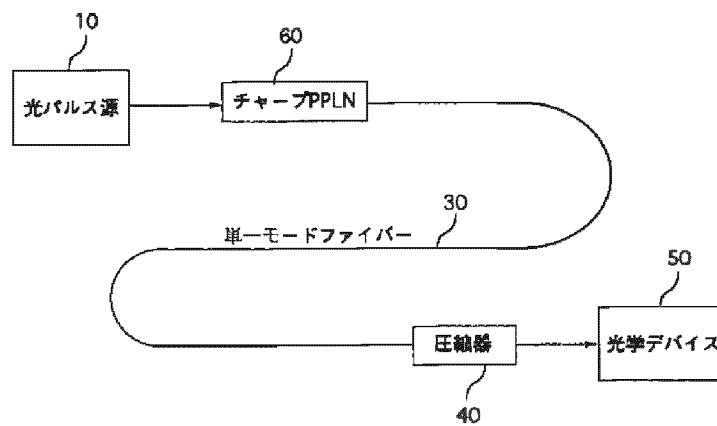
【符号の説明】

10：光パルス源 11：チャープ光パルス源
20：パルス伸張器 30：単一モード光ファイバー
40：パルス圧縮器 50：光学デバイス
60, 70：チャープPPLN（周期ポーリング・ニオブ酸リチウム結晶）
80：周波数変換装置

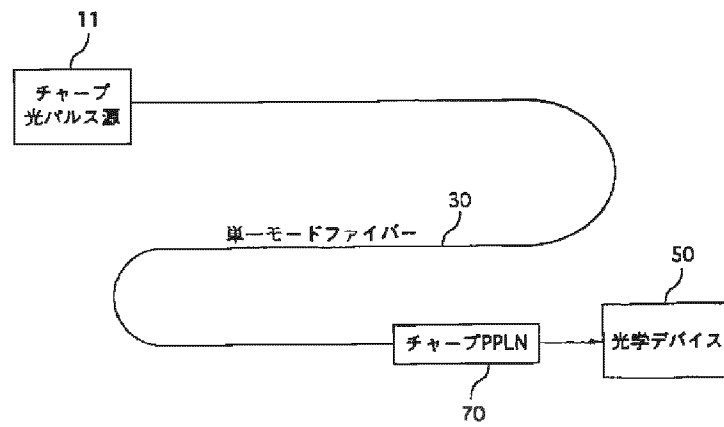
【図1】



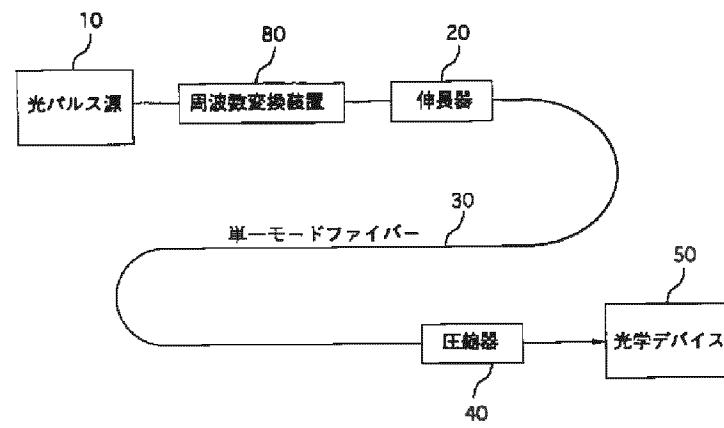
【図2】



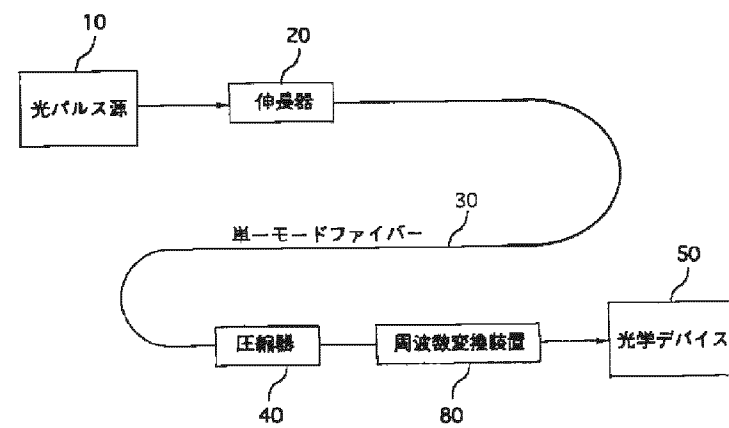
【図3】



【図4】



【図5】



フロントページの続き

(72)発明者 アルマンテス ガルバナスカス
アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ
ー レイバイン・コート4968番地

(72)発明者 ドナルド ジュー ハーター
アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ
ー サルグレイブ・ブレイス3535番地

(72)発明者 グレック デイー スーハ
アメリカ合衆国 ミシガン州 マンチェス
ター シャロン・ホロー・ロード5450番地